

背面照射における透過光型スピン偏極電子源のパルス応答性測定

MEASUREMENT OF PULSE RESPONSE WITH TRANSMISSION-TYPE SPIN-POLARIZED PHOTOCATHODES BY BACKSIDE-RADIATION

山口健太^{#, A)}, 山本尚人^{B)}, 保坂将人^{C)}, 宮内智寛^{A)}, 金秀光^{B)}, 高嶋圭史^{C), A)}, 加藤政博^{D), C), B)},
Kenta Yamaguchi^{#, A)}, Naoto Yamamoto^{B)}, Masahito Hosaka^{C)}, Tomohiro Miyauchi^{A)},
Xiuguang Kin^{B)}, Yoshifumi Takashima^{C), A)}, Masahiro Katoh^{D), C), B)}

^{A)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization KEK

^{C)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

^{D)} UVSOR, Institute for Molecular Science

Abstract

To study the temporal response of NEA-GaAs polarized photocathode systematically, we have developed a longitudinal profile measurement system for 20-keV electron beams using a deflector cavity. The measurement resolution is estimated to be 0.7 ps and the transmission-type strained superlattice photocathode was used as a test sample. The pump laser, with pulse width around 7.2 ps rms including time jitters was irradiated onto the photocathode. The electron bunch length and the temporal decay constant were evaluated to be 10.4 ps rms and 6.1 ps, respectively.

1. はじめに

1.1 NEA-GaAs 型フォトカソード

NEA-GaAs 型フォトカソード電子源は高スピン偏極度・低エミッタンス・大電流ビーム生成能力を兼ね備えた電子源として期待されており、電子・陽電子リニアコライダー^[1]や Electron-Ion-Collider^[2]の電子源として応用が検討されている。

これらの性能を満たすべく、我々は歪み補償型超格子フォトカソードの開発を行っている。この電子源では結晶性の改善と活性層膜厚の増加により、スピン偏極度を維持したままの量子効率向上を目指している^[3]。活性層膜厚の増加は実効的な量子効率向上に非常に有効であるが、パルス応答性に対する劣化を引き起こす可能性がある。

そのため、パルスレーザーに対する電子ビームのバンチ長測定やビームロスの原因と成り得るテール構造を評価することが必要となる。

1.2 パルス応答性測定システム

我々はフォトカソードのレーザーパルス応答性を評価するため、RF 偏向空洞を用いたパルス応答測定システムの開発を行った^[4]。本システムは励起用パルスレーザーと同期した RF 偏向空洞を用いることで、電子ビームを進行方向に対して垂直に蹴り、縦方向の情報を横方向に投影する。その後、この偏向された電子ビームをスクリーンモニターにより計測し、パルスレーザーに対する時間応答性を評価する。本発表では装置の概要と初期の実験結果について報告する。

2. 電子源サンプルと測定装置

2.1 電子源サンプルと背面照射型 20 kV 電子源

本測定では電子源サンプルとして、歪み超格子薄膜フォトカソードを用いた。本サンプルは活性層に GaAs/GaAsP 歪み超格子薄膜を用いたフォトカソードであり、基板に GaP を採用しているため透過光型としても利用可能である。本サンプルには後述する理由により量子効率は比較的低いが、90 %以上のスピン偏極度を実現している^[5]。

本サンプルの構造を Figure 1 に示す。本サンプルは活性層として 96 nm 厚の超格子層を持つ。また、中間層として GaAs 600 nm を挿入している。このため背面透過光型として利用した際、入射したレーザーの約 60 %が吸収される。

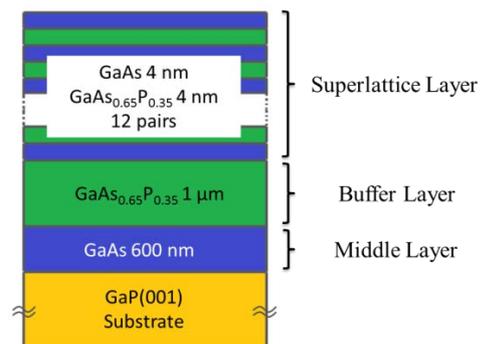


Figure 1: Schematic design of the photocathode.

本サンプルを透過光型電子源に特化した背面照射型 20 kV 電子源^[6]に装着し、評価を行った。

[#] yamaguchi.kenta@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

2.2 レーザーシステム

本測定では電子励起用レーザーとしてモードロック型 Ti:sapphire レーザー (COHERENT ; MIRA Optima 900-p) を用いた。本装置はレーザー発振器と電子源の配置の関係上、光ファイバーを利用したレーザー輸送を採用した。そこで我々は輸送時における波長分散を考慮し、回折格子を用いた波長分散補償システムを開発した。このシステムの導入により、実現できる最短のレーザーパルス長は 3.4 ps である。しかし、ストリークカメラによるレーザーパルス長の測定により、Figure 2 に示すようなタイムジッターが観測された。本測定では、2.3 節で説明するようなスクリーンモニター法を用いてビームサイズを測定しており、このタイムジッターは電子ビームのビームサイズ測定に影響をもたらす。

本計測ではタイムジッターを含んだレーザープロファイルによる測定となり、レーザーパルス長は実効的に 7.3 ps rms となる。

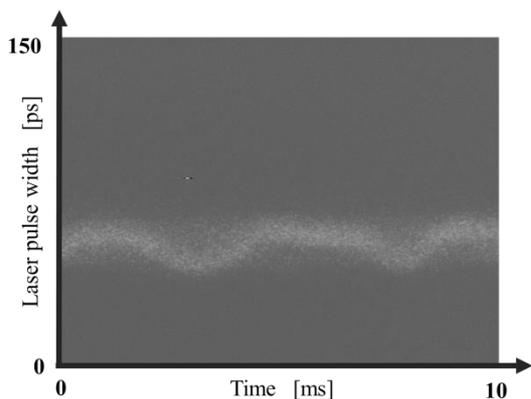


Figure 2: Measurement of jitter effect.

2.3 スクリーンモニター法

本研究におけるバンチ長測定では、電子ビームサイズの計測が必要になる。本システムでは、ビームサイズの測定方法として蛍光板とカメラを用いたスクリーンモニター法を採用した。この方法では電子ビームを蛍光板に入射することで発光する像を CMOS カメラで捉え、電子ビームのサイズを測定する。

我々は、遮蔽板とファラデーカップでビームサイズを測定する、ナイフエッジ法を用いてカメラの校正を行った。実際の電子ビームサイズについて両測定方法を用いて評価した結果、カメラのイメージ像における 1 pixel あたりの位置分解能は $22.0 \pm 0.4 \mu\text{m}$ と見積もられた。両方法による測定結果を Figure 3 に示す。

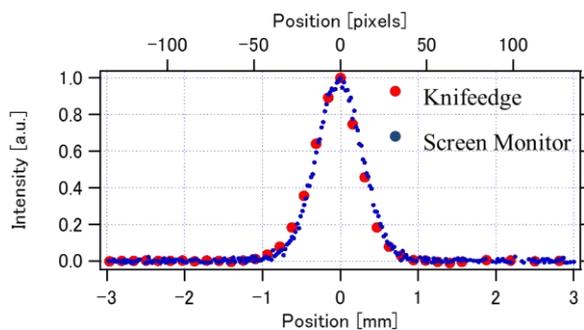


Figure 3: Results of beam size measurement.

2.4 最大磁束密度の測定

本システムによるビームプロファイルを評価するため、RF 偏向空洞の最大磁束密度を算出した。最大磁束密度は電子ビームが入射する時の RF 初期位相を変化させることで(1)式を利用し、求めた。

$$\Delta y = \frac{eL_s}{m\gamma\omega} B_0 \left\{ \sin \left(\omega \cdot \frac{L_c}{v_z} + \varphi \right) - \sin \varphi \right\} \quad (1)$$

Δy はビーム中心位置の変化量、 L_s は空洞出口からスクリーンまでの距離、 L_c は空洞長、 φ は RF 初期位相、 ω は RF の振動数、 e, m, v_z は 1 電子あたりの電荷量と質量、速度を示す。

本測定ではフェイズシフターにより、入力 RF 位相の変更を行った。最大磁束密度の見積もりは、電子ビームの中心位置と RF 初期位相に対応するフェイズシフターの位置を比較することで行った。

Figure 4 に偏向空洞への供給電力 5 W 時の測定結果を示す。

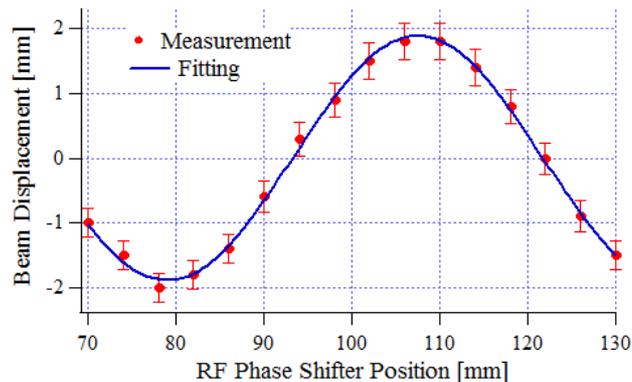


Figure 4: Beam displacements as a function of the rf phase shifter position.

以上の結果より、ビーム偏向の最大値を求めることができ、(1)式より最大磁束密度は $1.52 \pm 0.02 \text{ G}$ と求められる。2.3 節によるカメラ位置分解能が $22 \mu\text{m}$ より、本システムの時間分解能は 0.7 ps であることがわかった。以下の測定ではこの時間分解能を考慮し、評価を行った。

3. 測定結果

本システムによる電子バンチ長測定結果について報告する。Figure 5 に蛍光板上でのビームイメージを示す。(a) は偏向空洞に RF を供給していない時、(b) は偏向空洞に RF を供給している時のビームイメージを表す。本測定ではバンチ情報を正確に投影するため、ビームサイズ変化量が最大となるビーム中心の移動量が 0 のフェイズシフター位置を選択し、行った。

得られたデータより、ビームイメージが最も膨らんだ方向に対して輝度値を投影し、ビーム分布の比較を行った (Figure 6)。RF-on における結果では、時間軸負の分布をビーム head 側、正の分布をビーム tail 側となるように表した。得られた結果を正規分布関数で近似した結果、RF-off、RF-on 時のビームサイズを時間スケールで表すとそれぞれ、 8.8 ± 0.3 ps、 13.6 ± 0.1 ps であることが分かった。

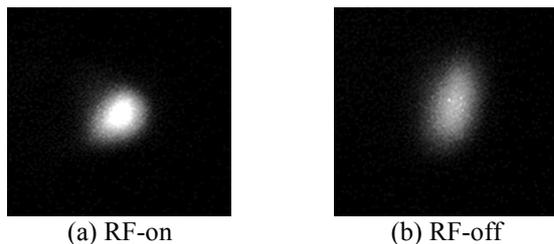


Figure 5: Beam profiles with or without rf powers.

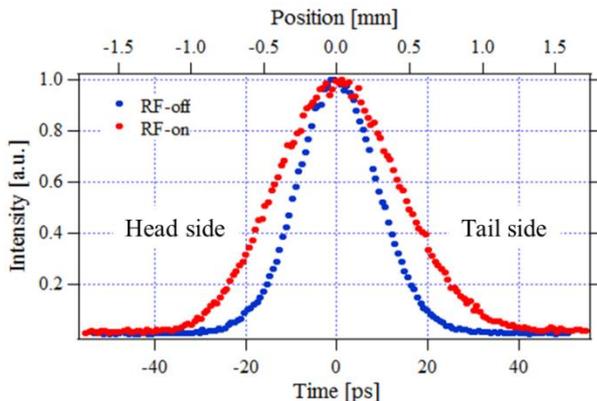


Figure 6: Beam distributions with or without rf powers.

4. 考察

3 章の測定結果を受け、7.3 ps のパルスレーザーに対する電子ビームバンチ長の見積もりとバンチ内におけるテール構造について評価した。

電子ビームバンチ長の算出には得られたビームサイズデータより、下の(2) 式で求めることができる。

$$\sigma_z = \frac{m\gamma c}{2eL_s B_0} \sqrt{\sigma_y^2 - \sigma_{y0}^2} \quad (2)$$

σ_z はバンチ長、 σ_y 、 σ_{y0} はそれぞれ、正規分布関数近似による RF-on 時のビームサイズ、RF-off 時のビームサイズを示す。

それぞれの値を代入した結果、本測定におけるバンチ長は 10.4 ± 0.8 ps と見積もることができた。

また、RF-on 時における head 側と tail 側のビーム分布形状に違いが見られたため、バンチテール構造の評価も行った。テール構造の評価は時間応答関数^[7]を使った、時間応答性を見積もりをすることで行った。ここでは Figure 6 における RF-on 時のビーム分布の結果を 1 成分による時間応答関数を用いて近似し、評価している。この結果により、本サンプルにおける時間応答性は 6.1 ± 0.3 ps と見積もることができた。

5. まとめと今後

我々は電子源のパルス応答性を評価するため、偏向空洞を用いた測定システムを開発した。初期の実験結果として、歪み超格子薄膜フォトカソードの時間応答が約 6 ps であるという結果を得た。今後はジッター問題の解決により精度を高め、膜厚層の異なる電子源の測定を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)No.11007344 (財)による助成 (代表者 山本尚人) で行った。

参考文献

- [1] <http://www.linearcollider.org/>
- [2] <http://web.mit.edu/eicc/>
- [3] X.G. Jin, et al., Applied Physics Letters 105, 203509 (2014).
- [4] T. Inagaki, et al., Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan(August 9-11, 2014, Aomori, Japan).
- [5] X.G. Jin, et al, Japanese Journal of Applied Physics 51 (2012) 108004.
- [6] N. Yamamoto, et al., Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan).
- [7] Y. Honda, et al., Japanese Journal of Applied Physics 52(2013)086401.